

УДК 669.15-194.58+669.15-196

Присвячується моєму вчителю Ю. М. Тарану
і другу та соратнику Є. П. Калінушкіну

ВИКОРИСТАННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ЕВТЕКТИЧНИХ КАРБИДАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ СТАЛЕЙ ТА ЧАВУНІВ

МИРОНОВА Т. М., д. т. н., проф.

Кафедра матеріалознавства ім. акад. Ю. М. Тарана, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-43-24, e-mail: t.myronova@mail.ru

Анотація. Постановка проблеми. Дослідження фазових перетворень у карбідах швидкорізальної сталі та білого чавуну необхідне для зміни структури їх евтектичної складової, а саме, порушення монолітної будови цементитного каркаса ледебуритних колоній і суцільності евтектичної сітки, а також зміни її розташування на більш сприятливе з погляду пластичної деформації. **Матеріал і методика досліджень.** Як матеріали використовували швидкорізальні сталі та доевтектичні білі чавуни з різним умістом вуглецю 2,92...3,35 %, а також із додатковим легуванням хромом, молібденом, вольфрамом, ванадієм. Сплави піддавали попереднім відпалам за температур 1 000...1 220 °С та випробували на гаряче кручення. Інформацію про структурні та фазові зміни отримували методами оптичної та електронної мікроскопії, використовуючи мікроскопи "АХІОМАТ" та "JSM-35". Мікрорентгеноспектральний та рентгеноструктурний аналіз проводили за допомогою аналізатора "САМЕВАКС" та дифрактометра ДРОН-3,0 УМ. **Результати досліджень.** Показано, що під час легування залізобуглецевих сплавів карбідотвірними елементами в їх структурі утворюються евтектики на базі метастабільних карбідів складного вмісту. У цих карбідах за теплової дії відбуваються фазові перетворення, направлені на перехід у більш стабільний стан. Такі переходи можна умовно поділити на два види: трансформація метастабільних карбідів у стабільні, розпад пересичених твердих розчинів на основі карбідів. Пластичність сплавів карбідного класу в більшості випадків залежить від поведінки евтектичної складової в процесі деформації і, головним чином, від структурних і фазових перетворень у крихких карбідах. **Практична значимість.** Використання ефекту дактилювання в економічно легovanому чавуні дозволяє проводити обробку тиском у промислових умовах, наприклад куванням або прокатуванням. **Висновки.** Утворення субзерених і міжфазних границь полегшує їх подрібнення у процесі деформації. Проте міра завершеності фазових перетворень і природа меж фаз, що утворюються, вносять істотні корективи у поведінку карбідів під час деформації. Виділення надлишкових карбідів ванадію з пересиченого карбиду заліза в білих чавунах інтенсифікується безпосередньо в процесі гарячої деформації, що зумовлює пластичну течію цементиту і підвищення пластичності чавуну.

Ключові слова: метастабільні карбіди; фазові перетворення; гаряче деформування; сталі карбідного класу; білі чавуни; підвищення пластичності

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КАРБИДАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

МИРОНОВА Т. М., д. т. н., проф.

Кафедра материаловедения им. акад. Ю. Н. Тарана, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-43-24, e-mail: t.myronova@mail.ru

Аннотация. Постановка проблемы. Исследование фазовых превращений в карбидах быстрорежущей стали и белого чугуна для изменения структуры их эвтектической составляющей, а именно, нарушение монолитного строения цементитного каркаса ледебуритных колоний и сплошности эвтектической сетки, а также изменение ее расположения, на более благоприятное с точки зрения пластической деформации. **Материал и методика исследований.** В качестве материалов использовали быстрорежущие стали и доэвтектические белые чугуны с разным содержанием углерода 2,92...3,35 %, а также дополнительно легированные хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием. Сплавы подвергали предварительным отжигам при температурах 1 000...1 220 °С и испытывали на горячее кручение. Информацию о структурных и фазовых изменениях получали методами оптической и электронной микроскопии, используя микроскопы "АХИОМАТ" и "JSM-35". Микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализ проводили с помощью анализатора "САМЕВАКС" и дифрактометра ДРОН-3,0 УМ. **Результаты исследований.** Показано, что при легировании железоуглеродистых сплавов карбидообразующими элементами в их структуре образуются эвтектики на базе метастабільных карбидов сложного состава. В этих карбидах при тепловом воздействии происходят фазовые превращения, направленные на переход в более стабильное состояние. Такие переходы можно условно разделить на два вида: трансформация метастабільных карбидов в стабильные, распад пересыщенных твердых растворов на основе карбидов.

Пластичність сплавів карбидного класу в більшості випадків залежить від поведінки евтектичної складової в процесі деформування і, головним чином, від структурних і фазових перетворень в крихких карбідах. **Практична значимість.** Використання ефекту дактилізації в економічно легированому чугуні дозволяє проводити обробку тиском в промислових умовах, наприклад ковкою або прокаткою. **Висновки.** Утворення субзернистих і межфазних границь сприяє їх дробленню при деформуванні. Однак ступінь завершеності фазових перетворень і природа границь утворюються фаз вносять суттєві корективи в поведінку карбидів при деформації. Виділення надлишкових карбидів ванадію з пересиченого карбіда заліза в білих чгуні інтенсифікується безпосередньо в процесі гарячої деформації, що призводить до пластичному теченню цементиту і підвищенню пластичності чгуну.

Ключові слова: метастабільні карбіди; фазові перетворення; гаряче деформування; сталі карбидного класу; білі чгуну; підвищення пластичності

USING OF PHASE TRANSFORMATIONS IN THE EUTECTIC CARBIDES FOR INCREASE IN PLASTICITY BY STEELS AND CAST

MYRONOVA T.M., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Materials Science by Yu. N. Taran, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-43-24, e-mail: t.myronova@mail.ru

Abstract. Raising of problem. Studying of phase transformations is into the carbides of rapid tool steel and white cast-iron for structure changes in their eutectic constituent namely in disturbing of monolithic structure of ledeburite colonies cementite structure and eutectic net continuity. Also the mentioned heat treatment modes are targeted to the eutectic net shift for the most suitable position from the point of plastic deforming. **Materials and methodology of researches.** The hypoeutectic rapid tool steels and white cast irons with 2,92...3,35 % carbon content and additionally alloyed by chrome, molybdenum, tungsten vanadium have been used as the research materials. The mentioned alloys have been pre-heat treated at a temperature 1 000...1 220 °C and hot twist tested. Information about structural and phase changes was got the methods of optical and electronic microscopy, by "Axiomat" and "JSM-35". Micro x-ray photography spectral a x-ray structural analysis was conducted by means of analyzer "CAMEBACS" and «ДРОН-3,0 УМ». **Research Results.** The research results showed that the under the alloying of iron-carbon alloys by carbide forming elements the eutectics form in their structure. The mentioned eutectics are based on complex composition metastable carbides. The phase transformations which are targeted to the shifting to stable state take place in complex composition metastable carbides under the heat impact. Such shifts could be relative divided into two types. The first one is metastable carbides transformation into stable ones. The second type is the breakdown of carbide based supersaturated solid solutions. The carbide class alloys plasticity in most cases depends from eutectic constituent behavior during deformation process and mainly from structure and phase transformations in brittle carbides. **Practical significance** The use the effect of дактилізації в економічно легированому білому чгуні дозволяє проводити тиском обробку в промислових умовах, наприклад ковкою або прокаткою. **Conclusions.** The formation of sub-grain and inter-phase borders simplifies brittle carbides breakdown under deformation. However the phase transformations stage of completion and nature of formed phase's borders significantly influence the carbide behavior during deformation. The article is represented that the excessive vanadium carbides precipitation from supersaturated iron carbide in white cast irons intensifies directly under hot deforming which is resulted in cementite plastic flow and cast iron plasticity increasing.

Keywords: metastable carbides; phase transformations; hot deforming; steels of carbide class; white cast irons; plasticity increasing

Вступ

Значну кількість деталей в сучасній металургії та машинобудуванні виготовляють із сплавів евтектичного типу, до яких належать білі чавуни та сталі карбидного класу. Загальне положення – для майже усіх сплавів евтектичного типу – позитивний вплив обробки тиском, що сприяє подрібненню евтектичної сітки, причому це стосується і залізовуглецевих, і кольорових сплавів [1–7]. Багаторічний досвід досліджень, накопичений дніпропетровською школою матеріалознавців, очолюваною понад 30 років видатним ученим, академіком АН України Ю. М. Тараном, дозволив розробити засадничі методи управління структуроутворенням у залізовуглецевих сплавах евтектичного типу, до яких належать швидкорізальні сталі і білі чавуни [1; 6–8].

Ще починаючи з 30-х років минулого століття і до сьогодні результатами досліджень було доказано [9; 10], що пластична деформація значною мірою сприяє поліпшенню механічних характеристик білого чавуну, перетворюючи його на матеріал, що має унікальний комплекс властивостей та поєднує високу твердість, зносостійкість, міцність, здатність протистояти ударним навантаженням і коливанням температур.

Керування структуроутворенням у білих чавунах для підвищення їх пластичності – актуальна проблема. Важливо також скористатися досвідом дослідження пластичності легированих сталей ледобуритного класу, що є структурними аналогами білих чавунів [8]. Таким чином, дослідження впливу термічної обробки на структурні зміни в білих чавунах, що зумовлюють підвищення їх пластичності, – це актуальне завдання.

Результати досліджень та їх обговорення

За температур гарячої деформації структура залізовуглецевих сплавів карбідного класу, незалежно від хімічного складу, складається з дендритів аустеніту з частками вторинних карбідів та евтектики, що утворює замкнуту або переривчасту сітку навколо аустенітних гілок. Досліджували структурні та фазові зміни в евтектиках сталі Р6М5, а також в евтектичному цементиті чавунів, що містять Сг, Мо, W, V (табл.).

Результати мікроструктурного та рентгеноструктурного аналізу показали, що найбільшою різноманітністю евтектична складова представлена у вольфрамомолібденових швидко різальних сталях. У сталі Р6М5 основними типами є (рис. 1): скелетна евтектика, її базовий карбід – M_6C , подібний до карбиду вольфраму; стрижнева і пластинкова евтектики, утворені на базі одного карбиду M_2C , але мають різні морфології, та ванадієвокарбідна в невеликій кількості.

У процесі гарячої обробки тиском першим починає деформуватися аустеніт, натискаючи на евтектичні колонії. Їх поведінка залежить від багатьох факторів: морфології, типу кристалічної будови та орієнтування відносно діючих напружень.

Таблиця

**Хімічний склад експериментальних чавунів* /
Chemical composition of experimental
cast-irons***

№ з/п	Вміст елементів, % за масою						
	С	Сг	V	Мо	W	Si	Mn
1	2,38	0,51	–	–	–	0,15	0,18
2	3,20	0,54	–	–	–	0,17	0,26
3	3,11	0,45	2,35	–	–	0,18	0,21
4	3,09	4,81	–	–	–	0,61	0,41
5	3,10	3,88	0,50	–	–	0,32	0,28
6	3,00	–	–	–	3,93	0,15	0,20
7	3,05	–	–	4,91	–	0,17	0,19

*Вміст S і Pd < 0,35

Однак у всіх випадках дроблення карбідних кристалів у процесі деформації полегшується за наявності в них субмеж і міжфазних меж. У свою чергу, утворення таких меж може відбуватися в процесі карбідного перетворення. Наприклад, карбід пластинкової і стрижневої евтектик M_2C під час високотемпературного відпалу розпадається з утворенням карбідів M_6C і MC . У граничному випадку це перетворення відбувається за такою реакцією: $(V, W, Mo)_2C + A \rightarrow (W, Mo, Fe)_6C + VC$.

Перетворення починається зародженням карбідів M_6C на поверхні карбиду M_2C з аустенітом і поступово просувається до центра пластини (рис. 2 а). При цьому на межі початкового карбиду і того, що знову утворився, виділяються кристали VC. Із часом карбідна пластинка складається вже з двох фаз: VC та M_6C (рис. 2 б).

Переважаючим механізмом деформації карбідів цих евтектик за температур 1 120...1 200 °С є ковзання і розділення по міжфазних межах M_6C/MC (рис. 2 в). У результаті карбідна сітка поділяється на частини, і карбідні включення розгалужуються в аустеніті. Особливо важливий у даному випадку ступінь завершеності карбідного перетворення. В пластинках із незавершеною реакцією, тобто із збереженням у пластині неперетвореної серцевини, ймовірно утворення поперечних тріщин, що негативно впливає на пластичність.

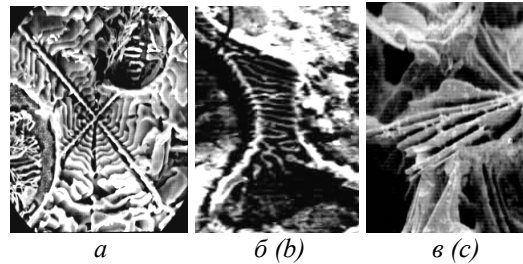


Рис. 1. Евтектики в сталі Р6М5: а – скелетна; б – стрижнева; в – пластинкова, $\times 3\ 500$ / Fig. 1. Eutecticum of steel P6M5: а – skeleton; б – bar's form; в- plate's form, $\times 3\ 500$

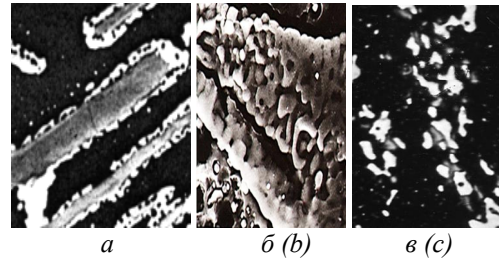


Рис. 2. Перетворення в евтектичному карбіді M_2C сталі Р6М5 після відпалу за 1 220 °С: а – 30 хв, $\times 1\ 000 \times 2$; б – 100 хв, $\times 3\ 000$; в – після деформування, $\times 1\ 000 \times 2$ / Fig. 2. Converting into the eutecticum carbide after annealing at 1 220 °С: а – 30 min, $\times 1\ 000 \times 2$; б – 100 min, $\times 3\ 000$; в – after deformation, $\times 1\ 000 \times 2$

Для легування білого чавуну додають такі елементи як хром, молібден, вольфрам, ванадій та ін.

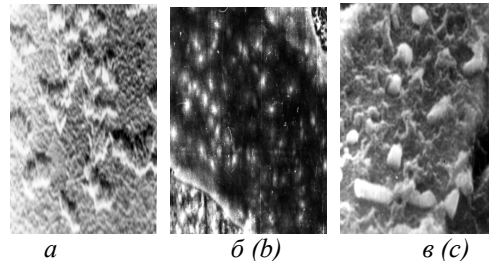


Рис. 3*. Розширення та виділення надлишкових фаз у цементиті, легуваному хромом (а), молібденом (б), вольфрамом (в): а, в – $\times 20\ 000$, REM; б – $\times 2\ 000$, оптична мікроскопія / Fig. 3. Stratification and formation of surplus phases are in cementite, alloyed by a chrome (а), molybdenum (б), tungsten: а, в – $\times 20\ 000$, REM; б – $\times 2\ 000$, optical microscopy

У ледебуриті чавунів, легованих ванадієм, у процесі відпалу спостерігається фазове перетворення, що відповідає реакції: $(\text{Fe}, \text{V})_3\text{C} \rightarrow \text{VC} + \text{аустеніт} + \text{Fe}_3\text{C}$. Тобто в пересиченому цементиті виділяються карбіди ванадію, за рахунок чого частина цементиту знеуглецьовується і перетворюється на аустеніт, при цьому вміст ванадію в карбіді заліза знижується (рис. 4).

Унікальність цього перетворення полягає не в тому, що воно спостерігається в процесі теплової обробки перед деформуванням і спричинює порушення монолітності цементиту в колоніях ледебуриту за рахунок утворення міжфазних меж $\text{VC} / \text{Fe}_3\text{C}$, як це спостерігалось у карбіді M_2C сталі Р6М5 (рис. 2 в).

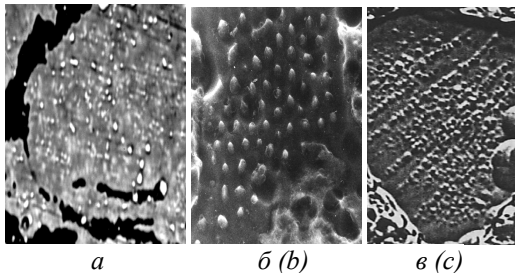


Рис. 4*. Карбідне перетворення в цементиті, легованому ванадієм: а – $\times 1\ 200$; б, в – $\times 3\ 200$, РЕМ / Fig. 4. The carbidic transformation is into cementite, alloyed by vanadium: а – $\times 1\ 200$; б, в – $\times 3\ 200$, REM

Феномен даного фазового переходу в ванадієвих чавунах полягає в такому [12; 13]. З одного боку, об'ємний ефект від виникнення карбідів VC у цементиті сприяє генеруванню дислокацій і полегшує їх пересування в процесі пластичної деформації за рахунок підвищення концентрації нерівноважних вакансій, а з іншого боку, на дефектах, у тому числі дислокаціях та лініях ковзання, полегшується зародження нових кристалів карбідів VC . Тобто відбувається «автокаталітична» реакція. Деформація – своєрідний стимулятор фазових перетворень. Ефект пластифікування цементиту безпосередньо в процесі деформування був названий дактилюванням [13]. На рисунку 5 показано результати випробувань на гаряче кручення експериментальних чавунів, складі яких наведені в таблиці.

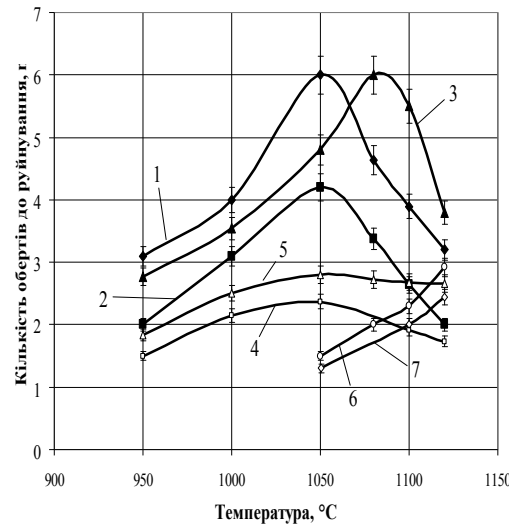


Рис. 5. Результати випробувань на гаряче кручення експериментальних чавунів / Fig. 5. Results of tests of the hot twisting of experimental cast-irons

Пластичність чавуну складу 3, в цементиті якого спостерігається ефект дактилювання, вища у 2...2,5 раза порівняно з іншими сплавами з такою ж кількістю ледебуриту, та відповідає рівню пластичності нелегованого чавуну із значно меншою кількістю евтектики (сплав 1). Використання ефекту дактилювання разом із додатковими відпалами дозволяє проводити обробку тиском у промислових умовах, наприклад куванням або вальцюванням.

Висновки

1. В евтектичних карбідах швидкорізальних сталей і легованих чавунів відбуваються фазові перетворення, що суттєво впливають на поведінку цих сплавів у процесі гарячої деформації. Рівень пластичності цих сплавів суттєво залежить від ступеня, механізму та мікрокартини перетворення.
2. Утворення додаткових міжфазних границь у базових евтектичних карбідах сприяє в цілому підвищенню пластичності.
3. Ступінь незавершеності карбідного перетворення знижує пластичність сталі Р6М5.
4. У ледебуриті легованих ванадієм чавунів відбувається карбідне перетворення, яке посилюється безпосередньо під час деформування і сприяє підвищенню пластичності чавуну.

* *Фотографії мікроструктур (рис. 3 б та 4 а, в) виконав на РЕМ "JSM-35" Євген Павлович Калінушкін*

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Таран-Жовнир Ю. Н. Строение эвтектик и создание новых сплавов эвтектического типа / Ю. Н. Таран-Жовнир // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. – Київ, 1998. – С. 176 – 197.
2. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов : монография / М. Я. Дзугутов. – Москва : Металлургия, 1990. – 302 с.
3. Фирстов С. А. Титановые «чугуны» и титановые «стали» / С. А. Фирстов, С. В. Ткаленко, Н. Н. Кузьменко // Металловедение и термическая обработка металлов. – Москва, 2009. – № 1. – С. 14–29.

4. Щербединский Г. В. Чугун как перспективный материал XXI столетия / Г. В. Щербединский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – Москва, 2005. – № 7. – С. 83–93.
5. Mittemeijer Eric J. *Fundamentals of Materials Science* / Eric J. Mittemeijer // Springer. – 2011. – 500 p.
6. Таран Ю. Н. О структуре эвтектик в металлических сплавах / Ю. Н. Таран // *Структура металлических сплавов*. – Киев : Наукова думка, 1966. – С. 91–102.
7. Структура эвтектических сплавов : монография / [Ю. Н. Таран, В. И. Мазур]. – Москва : Metallurgiya, 1978. – 311 с.
8. Таран Ю. Н. Карбидные превращения в литой стали Р6М5 при высокотемпературной обработке / Ю. Н. Таран, П. Ф. Нижниковская, О. Н. Гришина, Г. Ф. Демченко // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – Москва, 1976. – № 2. – С. 37–40.
9. Баранов С. А. Ковка чугуна / С. А. Баранов // «Сообщения Всесоюзного института металлов». – 1931. – № 8. – С. 12–14.
10. Giesserei: monograph / H. Nipper, E. Piwowarsky. – 1941. – № 28. – 305 p.
11. Carbide Transformations Eutectic Cementite During The Hot Working of Chromium Vanadium Alloy White Irons: monograph / [P. F. Nichnicovskaya, T. M. Mironova, Yu. N. Taran] // The Minerals & Metals Society. – Pittsburg, 1993. – 51 p.
12. Миронова Т. М. Управление формированием структуры в белых ледебуритных чугунах на различных этапах деформационного передела / Т. М. Миронова, М. М. Рябчий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 4. – С. 79–81.
13. Структура и свойства деформируемых чугунов : монография / [Т. М. Миронова, В. З. Куцова]. – Днепропетровск : Дриант, 2009. – 190 с.

REFERENCES

1. Taran-Zhovnir Yu.N. *Stroenie evtektik i sozdanie novyx splavov evtekticheskogo tipa* [The structure of eutectics and the creation of new alloys of eutectic type]. *Suchasne materialoznavstvo XXI storichchya* [The modern science of the XXI century]. Kyiv, 1998, pp. 176–197. (in Russian)
2. Dzugutov M.Ya. *Plasticheskaya deformatsiya vy'sokolegirovanny'x stalej i splavov* [Plastic deformation of high-alloyed steels and alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1990, 302 p. (in Russian)
3. Firstov S.A., Tkalenko S.V. and Kuz'menko N.N. *Titanovy'e «chuguny'» i titanovy'e «stali»* [Titanium "cast irons" and titanium "steels"]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. Moscow, 2009, no. 1, pp. 14–29. (in Russian)
4. Shherbedinskiy G.V. *Chugun kak perspektivnyj material XXI stoletiy* [Cast iron as a promising material XXI century]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. Moscow, 2005, no. 7, pp. 83–93. (in Russian)
5. Mittemeijer Eric J. *Fundamentals of Materials Science*. Springer, 2011, 500 p.
6. Taran Yu.N. *O strukture evtektik v metallicheskix splavax* [The structure of eutectics in metal alloys]. *Struktura metallicheskikh splavov* [Struktura metallicheskix splavov]. Kyiv : Naukova dumka, 1966, pp. 91–102. (in Russian)
7. Taran Yu.N. and Mazur V.I. *Struktura evtekticheskix splavov* [Structure of eutectic alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1978, 311 p. (in Russian)
8. Taran Yu.N., Nizhnikovskaya P.F., Grishina O.N. and Demchenko G.F. *Karbidny'e prevrashheniya v litoj stali R6M5 pri vy'sokotemperaturnoj obrabotke* [Carbide transformation in cast steel R6M5 during high-temperature processing]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 1976, no. 2, pp. 37–40. (in Russian)
9. Baranov S.A. *Kovka chuguna* [Wrought iron]. "Soobshheniya Vsesoyuznogo instituta metallov" ["The message of the all-Union Institute of metals"]. 1931, no. 8, pp. 12–14. (in Russian)
10. Nipper H. and Piwowarsky E. *Giesserei*. 1941, no. 28, 305 p.
11. Nichnicovskaya P.F., Mironova T.M. and Taran Yu.N. *Carbide Transformations Eutectic Cementite During The Hot Working of Chromium Vanadium Alloy White Irons*. The Minerals & Metals Society. Pittsburg, 1993, 51 p.
12. Mironova T.M. and Ryabchij M.M. *Upravlenie formirovaniem struktury' v bely'x ledeburitny'x chugunax na razlichny'x etapax deformacionnogo peredela* [Control of the formation of the structure of ledeburite in white cast irons at different stages of deformation redistribution]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promy'shennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2008, no. 4, pp. 79–81. (in Russian)
13. Mironova T.M. and Kutsova V.Z. *Struktura i svoystva deformiruemyyh chugunov* [Structure and properties of wrought iron]. Dnepropetrovsk : Driant, 2009, 190 p.

Поступила в редколлегию 25.02.2017

Принята в печать 03.03.2017